

VOÇOROCAS EM ÁREAS DE MINERAÇÃO COMO COMPONENTE DA PAISAGEM DA BACIA HIDROGRÁFICAS DO RIO GUAMÁ, AMAZÔNIA ORIENTAL

**Gullies in mining areas as landscape part of the Guama river watershed,
Eastern Amazon**

Isabela Farias Lima,
Instituto Tecnológico Vale
isabelafariaslimaa@gmail.com

Aline Maria Meiguins de Lima
Universidade Federal do Pará – UFPA
ameiguins@ufpa.br

Nicolau Akio Kubota
Universidade Federal do Pará – UFPA
nickubota@gmail.com

Recebido em 29/04/2021

Aceito em 28/05/2021

RESUMO: A atividade mineral realizada na bacia hidrográfica do rio Guamá (nordeste do estado do Pará), atua principalmente próximo aos cursos d'água gerando impactos ambientais, como por exemplo, o desenvolvimento de feições erosivas. Este trabalho teve por objetivo avaliar os componentes da paisagem natural e antrópica condicionantes do desenvolvimento de feições erosivas nas sub-bacias do médio-alto curso do rio Guamá, além das condições que favoreceram o desenvolvimento de voçorocas decorrentes da atividade mineral. A metodologia associada envolveu a análise da paisagem componente em ambiente SIG (aspectos fisiográficos e de uso da terra), além da caracterização em campo de voçorocas, utilizando um protocolo específico. Os resultados indicam que as sub-bacias avaliadas já apresentam cerca de 54% de seu território destinado ao uso agropecuário e 42% com cobertura florestal remanescente ou secundária. E a área delimitada como de influência da atividade mineral, contém mais de 50% de alteração, comprometendo principalmente a faixa ripária. O conjunto de informações avaliadas indica que a evolução da atividade mineral na região não tem se manifestado de forma sustentável, favorecendo o surgimento de voçorocas, cujo processo de recuperação já se encontra na faixa mais elevada de custo, o que implica que deve ser exercida uma maior pressão no setor mineral para redução destes impactos.

Palavras-chave: Erosão; Uso da terra; Atividade mineral.

ABSTRACT: The mineral activity in the hydrographic basin of the Guamá River (northeastern of the Pará state) operates mainly close to water bodies generating environmental impacts. Such as the development of erosive features. This work aimed to evaluate the components of the natural and anthropic landscape that condition the development of erosive features in the sub-basins of the medium-high course of the Guamá River; and how these conditions favored the development of gullies resulting from the mineral activity. The associated methodology involved the landscape evaluation in a GIS environment (physiographic and land use aspects) and the gully characterization in fields, using a specific protocol. The results indicate that the sub-basins evaluated already have about 54% of their territory destined for agricultural use and 42% with remaining or secondary forest cover. And the area defined as the influence area of mineral activity contains more than 50% of alteration, mainly affecting the riparian zone. The results indicate that the evolution of mineral activity in the region has not sustainably, which favors the emergence of gullies. The recovery process is already in the highest cost range, which implies a higher pressure on the mineral sector to reduce these impacts.

Keywords: Erosion; Land use; Mineral activity.

INTRODUÇÃO

A construção civil emprega como insumo mineral os sedimentos arenosos (areias), seixos, argilas e outros materiais, que podem ser denominados de minerais sociais, onde sua extração ocorre normalmente próxima aos centros consumidores, ou seja, as sedes municipais, tanto de forma artesanal como industrial, e a principal metodologia adotada, em geral, é o método de lavra a céu aberto com baixo emprego de tecnologias, havendo um predomínio de empresas de pequeno e médio porte, segundo Souza et al. (2016).

Os impactos negativos podem ser avaliados em diferentes proporções e períodos de duração, sendo associados tanto as fases iniciais, como de abertura das cavas até seu fechamento, tais alterações afetam os vários ambientes (natural e antrópico), podendo representar situações de risco pela instabilidade de taludes e encostas (COLEHO et al., 2020); esta situação é favorecida pela ocorrência de práticas ilegais de extração, tendo como uma de suas principais consequências o desenvolvimento de feições erosivas de diferentes portes, culminando na formação de voçorocas.

As voçorocas são resultantes da evolução de processos erosivos no perfil de alteração solo-rocha, que afetam de forma significativa os serviços ecossistêmicos, principalmente em decorrência de suas dimensões (superiores a 0,5 m); sua origem é associada a fluxos concentrados de água durante e imediatamente após um evento de chuva, ou pela ação antrópica em áreas potencialmente erosivas, tendo como exemplos principais as atividades agropecuárias e de extração mineral (KARYDAS; PANAGOS, 2020).

A paisagem definida pelo ambiente das bacias hidrográficas, corresponde a um sistema que na condição de equilíbrio apresenta um gradiente adequado para executar sua ação erosiva e deposicional, quando este é perturbado, por exemplo, por fluxos maiores do que a normalidade que ocasionam a intensificação dos processos erosivos e o agravamento deste efeito pode gerar quedas e movimentos de massa; fluxos menores, porém prolongados, também podem ocasionar o mesmo efeito, principalmente onde a vegetação não oferece obstáculo (como retenção e interceptação da chuva) ocasionando assim menos resistência à erosão e maior possibilidade de ampliação do efeito e formação das voçorocas (KATZ et al., 2014; CASTILLO, C.; GÓMEZ, 2016).

Wang et al. (2017) ressaltam o efeito da topografia, do fluxo da água subterrânea (surgências) e da variabilidade litológica na evolução das voçorocas. Martín Duque et al. (2015) discutem os aspectos geomorfológicos integrados e a necessidade da aplicação de modelos evolutivos para melhor compreensão do potencial de desenvolvimento das feições erosivas, de sua recuperação e monitoramento, apresentando um elemento importante para as áreas onde se desenvolve a atividade de exploração mineral, denominado de "geomorfologia da mineração", visando analisar a distribuição espacial dos principais processos geomórficos que ocorrem na atividade mineral e o impacto da morfologia do talude na magnitude da erosão.

A preservação do patrimônio natural relacionado com a mineração deve receber igual prioridade dado seu valor, conseqüentemente, os procedimentos de recuperação e gestão ambiental precisam estar articulados (ABAD, 2019). Neste contexto, entende-

se que a atividade mineral realizada na bacia hidrográfica do rio Guamá (BHRG), situada na porção nordeste do estado do Pará (Brasil), deve receber atenção, pois abastece a Região Metropolitana de Belém (RMB), além dos municípios do entorno. De forma específica, destaca-se a atividade voltada para construção civil, com a extração principalmente de seixo e areia, localizada na região que marca o limite entre a porção mediana da bacia e seu alto curso, nesta estão localizados majoritariamente nos municípios de Capitão Poço e Ourém. Desta forma, este trabalho teve por objetivo avaliar os componentes da paisagem natural e antrópica condicionantes do desenvolvimento de feições erosivas nas sub-bacias do médio-alto curso do rio Guamá, além das condições que favoreceram o desenvolvimento de voçorocas decorrentes da atividade mineral.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada buscou avaliar como cada uma das variáveis ambientais (geologia, geomorfologia, precipitação pluviométrica e hidrografia) e as formas de uso da terra, contribuem para o processo de surgimento e expansão das voçorocas, mediante o potencial natural de geração de feições erosivas e o decorrente da atividade de extração mineral. A área de estudo abrange as unidades territoriais dos municípios de Capitão Poço e Ourém (mais de 90% da área); além dos municípios de Santa Maria do Pará, Irituia e Bonito. Sua área total é de aproximadamente 955 km², representando sub-bacias componentes do Rio Guamá, nas margens esquerda e direita da bacia (Figura 1).

A base de dados adotada em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) constou do Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizando as imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*, com resolução espacial de 30 m); mapa geomorfológico gerado a partir do MDE e de anaglifos (elaborados a partir de imagens *GeoEye*, do sistema *Google Earth* que permitem uma aquisição de dados em uma escala de aproximadamente 1:8.000); carta da distribuição da precipitação pluviométrica (01/01/2010 a 01/01/2020) do *Global Satellite Mapping of Precipitation* (GSMaP) com 0,1 x 0,1 graus de resolução, este é um produto do *Global Precipitation Measurement* (GPM) *Mission*, que fornece observações a cada 3 horas de intervalo, o quantitativo é calculado com base no valor acumulado de 24 horas de chuva, este conjunto de dados é processado pelo algoritmo GSMaP versão 6 (versão do produto 3) e disponibilizado no sistema *Google Earth Engine*; mapa da rede de drenagem elaborado com base em imagens dos satélites *GeoEye*; mapa geológico adaptado a partir da base vetorial da CPRM, de Vasquez et al. (2008) na escala de 1:250.000; mapa de cobertura de solos foi adaptado com a partir da base vetorial do IBGE, na escala de 1:250.000; e pela carta de uso e cobertura da terra, elaborada com base em imagens dos satélites *RapidEye* (2015), de resolução espacial 5m.

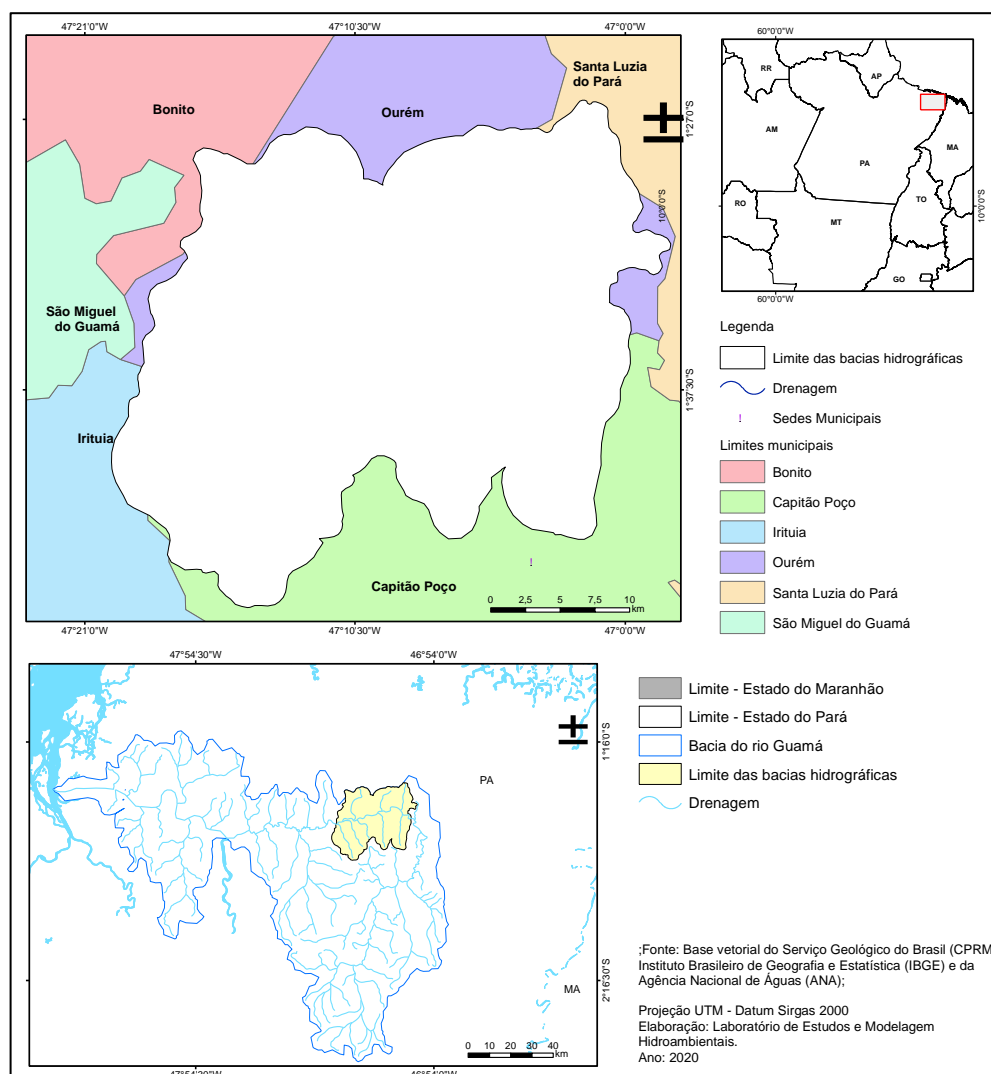




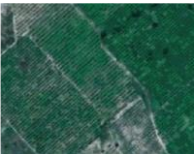

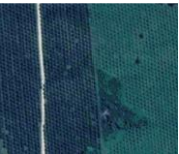



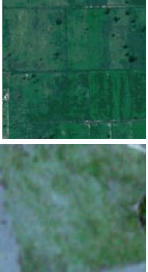

Figura 1. Localização da área avaliada.

Fonte: Elaborada pelos autores.

O processamento da carta de uso e cobertura da terra ocorreu a partir da identificação das unidades de paisagem presentes, que foram vetorizadas de forma que cada polígono passou a representar um fragmento de tipo de uso e ocupação da terra. A classificação foi obtida por meio da criação de uma Chave de Interpretação (Tabela 1) na qual, diferentes padrões de cor, textura, arranjo e forma, foram agrupadas, permitindo assim, a identificação de cada classe (IBGE, 2013). De forma complementar, a classificação foi validada com reconhecimento de campo.

O mapeamento das voçorocas constou da identificação por imagens de satélite (*GeoEye*) e reconhecimento em campo (outubro de 2019, período menos chuvoso), foram mapeadas 10 localidades (Figura 1), as quais encontram-se inseridas nas sub-bacias no alto curso da bacia do rio Guamá, de acordo com a classificação de Kubota et al. (2020): Igarapé Açú, Igarapé Curuçá, Igarapé Grande e Igarapé João Alves.

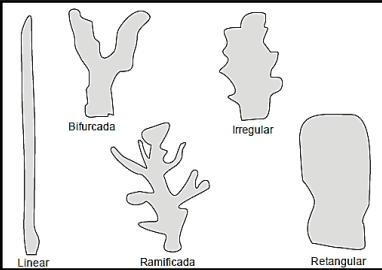
Tabela 1. Chave de interpretação para as classes de uso e ocupação da terra.

Classes	Imagem (GeoEye/ RapidEye)	Descrição	Classes	Imagem (GeoEye/ RapidEye)	Descrição
Área florestal		Aspecto distribuído de forma homogênea, e feições irregulares, geralmente associadas aos rios.	Solo exposto		Textura rugosa ou lisa em formas retangulares ou irregulares.
Área agrícola		Textura rugosa e formas regulares e alinhadas (com espaços).	Área de exploração mineral		Formas com texturas e geometria irregulares.
Reflorestamento		Textura rugosa e formas regulares e alinhadas (sem espaços).	Açude/ lago		Apresenta textura lisa, podendo conter formar regulares ou irregulares.
Vegetação secundária		Apresenta textura rugosa, no entanto não é homogênea, com áreas de textura lisa, de forma predominante regular.	Rio		Textura lisa e formas irregulares (curvilíneas).
Pastagem		Textura rugosas e formas predominantemente regulares.	Cidades, Vilas, Complexo Industrial e Propriedade Rural		Textura rugosa, com padrões retilíneos e formas regulares.

Fonte: Elaborada pelos autores.

No procedimento de quantificação e qualificação destas feições foi utilizado o protocolo de Miranda e Lima (2021), que classificou as voçorocas quanto: ao tipo (conectadas, desconectadas e integradas); a forma (linear, ramificada e irregular); ao tamanho (comprimento, largura e profundidade); e volume erodido em m³ (Tabela 2) (muito pequena, pequena, média, grande e muito grande).

Tabela 2. Elementos condicionantes para o mapeamento das voçorocas.

Quanto ao tipo	<ul style="list-style-type: none"> - Conectadas: escoamento concentrado nas partes baixas da encosta. - Desconectadas: encontrando-se na parte superior da encosta, não estão ligadas a nenhuma rede de drenagem. - Integradas: junção das formas anteriores, constituindo uma só incisão erosiva. 																				
Quanto à forma			<p>Em linear, bifurcada, ramificada, irregular e retangular. Onde cada forma é resultante de processos específicos e das características do local de ocorrência, tais como geologia (litologia e estrutura), relevo (forma e declividade), solo, cobertura vegetal e o sistema de drenagem superficial ou subsuperficial.</p>																		
Quanto ao tamanho	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ord.</th> <th>Volume erodido</th> <th>Tamanho</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>01</td> <td>Até 1.000 m³</td> <td>Muito pequena</td> </tr> <tr> <td>02</td> <td>de 1.000 m³ até 10.000 m³</td> <td>Pequena</td> </tr> <tr> <td>03</td> <td>Entre 10.000 m³ até 20.000 m³</td> <td>Média</td> </tr> <tr> <td>03</td> <td>Entre 20.000 m³ até 40.000 m³</td> <td>Grande</td> </tr> <tr> <td>05</td> <td>Mais de 40.000 m³</td> <td>Muito grande</td> </tr> </tbody> </table> <p>Relacionando ao volume erodido em m³, em: pequena, média, grande e muita grande.</p>			Ord.	Volume erodido	Tamanho	01	Até 1.000 m ³	Muito pequena	02	de 1.000 m ³ até 10.000 m ³	Pequena	03	Entre 10.000 m ³ até 20.000 m ³	Média	03	Entre 20.000 m ³ até 40.000 m ³	Grande	05	Mais de 40.000 m ³	Muito grande
Ord.	Volume erodido	Tamanho																			
01	Até 1.000 m ³	Muito pequena																			
02	de 1.000 m ³ até 10.000 m ³	Pequena																			
03	Entre 10.000 m ³ até 20.000 m ³	Média																			
03	Entre 20.000 m ³ até 40.000 m ³	Grande																			
05	Mais de 40.000 m ³	Muito grande																			

Fonte: Adaptado de Miranda (2019) e Miranda e Lima (2021).

Além disso, também foram identificadas feições erosivas secundárias presentes nas voçorocas, como por exemplo (CAMPOS et al., 2008): filetes subverticais e escamamento (ação do escoamento superficial em superfícies pouco coesas), alcovas de regressão (resultam do efeito do escoamento superficial na forma de filetes subverticais ou de surgências de água subterrânea), pedestais (ocorrência de salpicamento intercalado a remoção de partículas pelo efeito do escoamento superficial), sulcos e ravinas (estruturas do escoamento superficial concentrado), dutos e canais (remoção concentrada pelo efeito das águas ou eventuais ressurgências de zonas de saturação), costelas (variações da resistência ao cisalhamento dos materiais de cobertura superficial), marmitas (atuação de erosão por queda d'água na base de taludes), solapamento (queda de material sedimentar ou de blocos de rocha em decorrência do avanço da erosão), estruturas sedimentares de gretas de contração (feições hexagonais resultantes da perda de umidade) e movimentos de massa (deslocamento continuado de material no interior das feições erosivas).

No processamento das informações foram realizados os seguintes procedimentos em ambiente de geoprocessamento:

- 1 - Zoneamento da área de influência das estruturas identificadas, utilizando o estimador de Densidade Kernel (OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2017).
- 2 - Caracterização do ambiente fisiográfico e das formas de uso terra, com a elaboração da cartografia associada. Destacando que a delimitação de bacias hidrográficas e a definição da rede de drenagem foram elaboradas para este estudo, tendo como base o mapeamento geomorfológico realizado e o realizado por Kubota et al. (2020).
- 3 - Avaliação da distribuição percentual em área, relativa aos aspectos fisiográficos e das formas de uso terra.
- 4 - Espacialização da cobertura vegetal, em função das áreas de influência da rede de drenagem e das de ocorrência da atividade mineral. Neste processo, foi utilizado o algoritmo HAR (*Height Above Nearest Drainage*) do QGis (DILTS et al., 2010). Este é uma ferramenta auxiliar que avalia o percentual de influência das águas na faixa marginal de vegetação ou altura acima do rio, são dados de caráter preditivo em ambiente SIG, que fornecem uma oportunidade para derivar variáveis, como HAR, para grandes áreas.
- 5 - Definição espacial da distribuição da precipitação, média em mm/hora de 01/01/2010 a 01/01/2020, com sua associação à rede de drenagem e a área de ocorrência das voçorocas.
- 6 - E avaliação integrada usando as áreas potenciais de ocorrência de atividade mineral, de presença da cobertura vegetal e de influência direta nos sistemas hídricos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 (Tabela 3) apresenta o resultado da integração entre os dados fisiográficos (unidades hídricas, altimetria, unidades de relevo) com as formas de uso da terra. Observa-se que a associação cobertura vegetal e baixas topografias ocorre somente na unidade de relevo que caracteriza o vale principal do rio Guamá. Os demais vales e as vertentes que marcam as sub-bacias componentes são definidos por formas de uso da terra mais intensivas, o que tende a ocasionar impactos associados a perda de solo.

Em termos de zonas mais homogêneas, a altimetria definiu 3, formadas pela seguinte composição: Zona 1 - igarapé Pacuí Miri, Canais da margem direita do rio Guamá e igarapé Pacuí Claro; Zona 2 - igarapé Puraquequara, igarapé João Alves e igarapé Ajará; e Zona 3 - igarapé Grande, igarapé Açu, igarapé Cuia e igarapé Curuça.

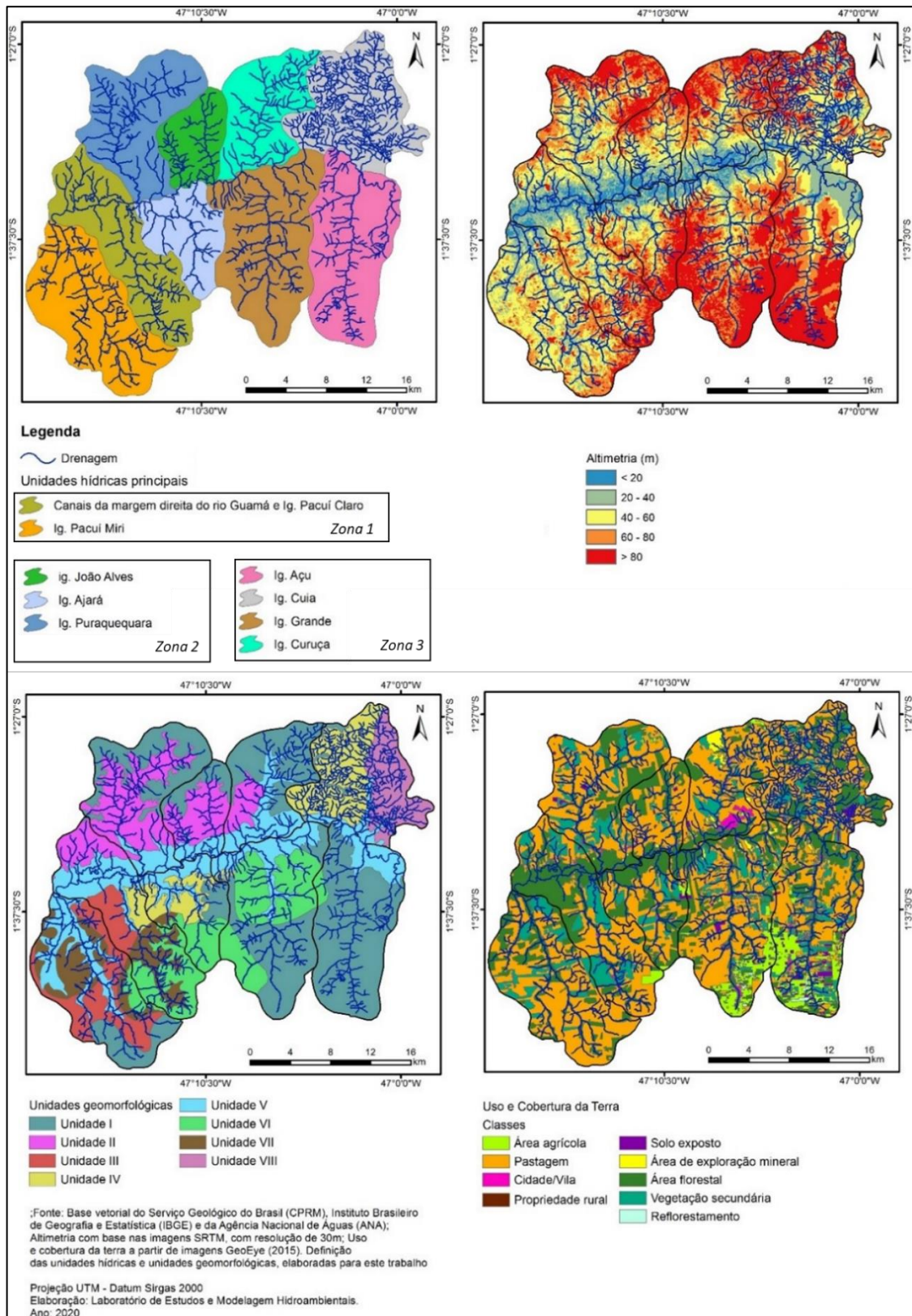


Figura 2. Caracterização do ambiente fisiográfico e das formas de uso terra.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 3. Distribuição em área (%) dos aspectos fisiográfico e das formas de uso terra.

Unidades hídras (sub-bacias)	Ig. Pacuí Miri	Canais da margem direita do rio Guamá e Ig. Pacuí Claro	Ig. Puraquequara	Ig. João Alves	Ig. Ajará	Ig. Grande	Ig. Açú	Ig. Cuia	Ig. Curuçã
Área da sub-bacia (km ²)	133,80	118,10	113,39	49,22	62,04	148,21	131,67	116,76	84,23
Altimetria (m)/Classes (%)									
< 20	2,07	9,61	5,43	7,18	8,22	4,22	1,25	3,63	7,03
20-40	22,75	24,28	16,74	19,36	17,52	10,48	14,91	17,28	16,24
40-60	47,12	29,02	27,36	31,87	24,28	17,55	14,76	35,38	19,70
60-80	22,40	24,27	29,24	25,61	26,29	31,29	24,88	31,21	32,79
> 80	5,66	12,81	21,24	15,97	23,69	36,46	44,20	12,50	24,24
Unidades de relevo (%)									
Unidade I - Relevo suavemente ondulado, platôs e morros de topos arredondados e angulares. Vales abertos, localmente fechados, com vertentes côncavo-retilíneas.	16,13	0,19	39,50	25,41	13,59	39,58	84,00	3,20	52,24
Unidade II - Relevo suavemente ondulado, localmente plano, platôs e morros de topos arredondados e angulares. Vales abertos, localmente fechados, com vertentes côncavo-retilíneas.	31,96	14,84	49,96	57,03	0,00	0,00	0,00	0,00	15,77
Unidade III - Relevo suavemente ondulado a ondulado, morros de topos arredondados, localmente com regiões aplainadas. Vales abertos, localmente fechados, com vertentes côncavo-retilíneas.	0,00	13,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Unidade IV - Relevo ondulado a plano, morros de topos arredondados. Vales abertos, com vertentes côncavo-retilíneas.	0,00	6,08	0,00	0,00	28,63	0,78	0,00	0,00	0,10
Unidade V - Relevo plano em regiões de planície. Vales abertos, localmente fechados com vertentes côncavo-retilíneas a côncavas e formas de topo plano a suavemente arredondado.	24,10	24,10	10,54	17,55	25,29	18,15	13,37	9,53	31,88
Unidade VI - Relevo suavemente ondulado a plano, colinas de baixas amplitudes e áreas aplainadas. Vales abertos, com vertentes côncavo-retilíneas e formas de topo plano a arredondado.	4,00	23,73	0,00	0,00	29,41	41,49	2,63	49,74	0,00
Unidade VII - Relevo suavemente ondulado, colinas com vales abertos, vertentes retilíneas e côncavas, formas de topo arredondado e localmente plano.	23,80	17,39	0,00	0,00	3,09	0,00	0,00	0,00	0,00
Unidade VIII - Região de elevadas altitudes, morros com orientação em N-S e E-W. Topos angulosos, com vertentes retilíneas a côncavas formando vales abertos.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	37,53	0,00
Uso e cobertura da terra (%)									
Cidade/Vila	0,19	0,70	0,61	0,31	0,12	0,49	0,62	0,00	4,48
Área de exploração mineral	0,00	0,00	0,14	0,67	0,00	1,27	0,72	0,36	4,92
Área agrícola	0,05	1,75	0,47	0,03	1,48	11,02	17,68	0,01	1,53
Pastagem	62,86	41,79	52,20	58,55	43,17	46,27	37,09	54,29	53,58
Vegetação secundária	12,71	17,96	17,67	4,61	11,16	10,39	11,28	9,67	9,95
Cobertura florestal	24,13	36,68	27,66	33,84	42,97	27,72	26,74	33,90	23,58
Solo exposto	0,00	0,07	0,95	1,22	0,48	2,45	5,26	1,26	1,07
Corpos d'água	0,05	1,05	0,29	0,78	0,62	0,39	0,61	0,50	0,90

Fonte: Elaborado pelos autores.

Segundo Vasquez et al. (2008), estas zonas compõem o contexto geológico de rochas metassedimentares e cristalinas do Cinturão Gurupi, sobrepostas por coberturas superficiais cenozoicas e sedimentos quaternários, sendo que as unidades mais afetadas correspondem aos sedimentos da Formação Barreiras, caracterizados por conglomerados, arenitos ferruginosos, arenitos com níveis de argilito e argilitos ferruginosos. E localmente pelo Granito Ourém. Disto resultam coberturas de solos marcadas pela presença de (IBGE, 2015): gleissolo háplico distrófico ao longo do vale principal do rio Guamá; argissolo vermelho-amarelo distrófico (predominando nas áreas das sub-bacias do igarapé Grande e Curuçã) e latossolo amarelo distrófico, como unidade dominante.

O seguimento que se direciona para a foz (Zona 1) é composto por formas que variam de platôs e morros de topos arredondados e angulares até planícies; predominando a tendência de aplainamento das formas. A região intermediária (Zona 2) mantém a presença de formas onduladas, com faixas altimétricas que irão marcar os platôs e morros de topos arredondados e angulares; e apenas localmente regiões mais planas. A parte que passa a compor o segmento a leste, em direção as cabeceiras da bacia do rio Guamá, representa os maiores níveis altimétricos, logo as formas de relevo passam a ter maior ondulação com a presença de estruturas orientadas (N-S e E-W).

As formas de uso (Pastagem - 62 a 37%) são predominantes em todos os segmentos avaliados, ficando em segundo plano a cobertura florestal (43 a 23%). O padrão observado não é favorável à manutenção do sistema hídrico e redução do potencial erosivo, pois a fragmentação florestal predomina na região, possibilitando a ação mais intensa do escoamento superficial como agente de remoção do solo e formador de feições erosivas (KATZ et al., 2014).

O zoneamento das áreas de exploração mineral, a partir da densidade de Kernel, definiu uma região total de 137,40 km², que influencia em ordem crescente as seguintes áreas hídricas: Ig. Curuçã - 33,64%; Ig. Grande - 23,56%; Ig. Açú - 11,58%; Ig. João Alves - 10,82%; Ig. Puraquequara - 8,88%; Ig. Cuia - 6,90%; Canais da margem direita do rio Guamá e Ig. Pacuí Claro - 2,66%; e Ig. Ajará - 1,96%. Da mesma forma que engloba uma área de 65,81 km² da cobertura vegetal total (16,31%). (Figura 3)

Observa-se que a maior intensificação das ações se encontra na Unidade V (Relevo plano em regiões de planície, com vales abertos, localmente fechados com vertentes côncavo-retilíneas a côncavas e formas de topo plano a suavemente arredondado) que marca o vale principal do rio Guamá e da sub-bacia do Ig. Curuçã e na Unidade VI (relevo suavemente ondulado a plano, colinas de baixas amplitudes e áreas aplainadas, com vales abertos, com vertentes côncavo-retilíneas e formas de topo plano a arredondado) que caracteriza a sub-bacia do Ig. Grande; estas apresentam mais de 50% de sua área alterada.

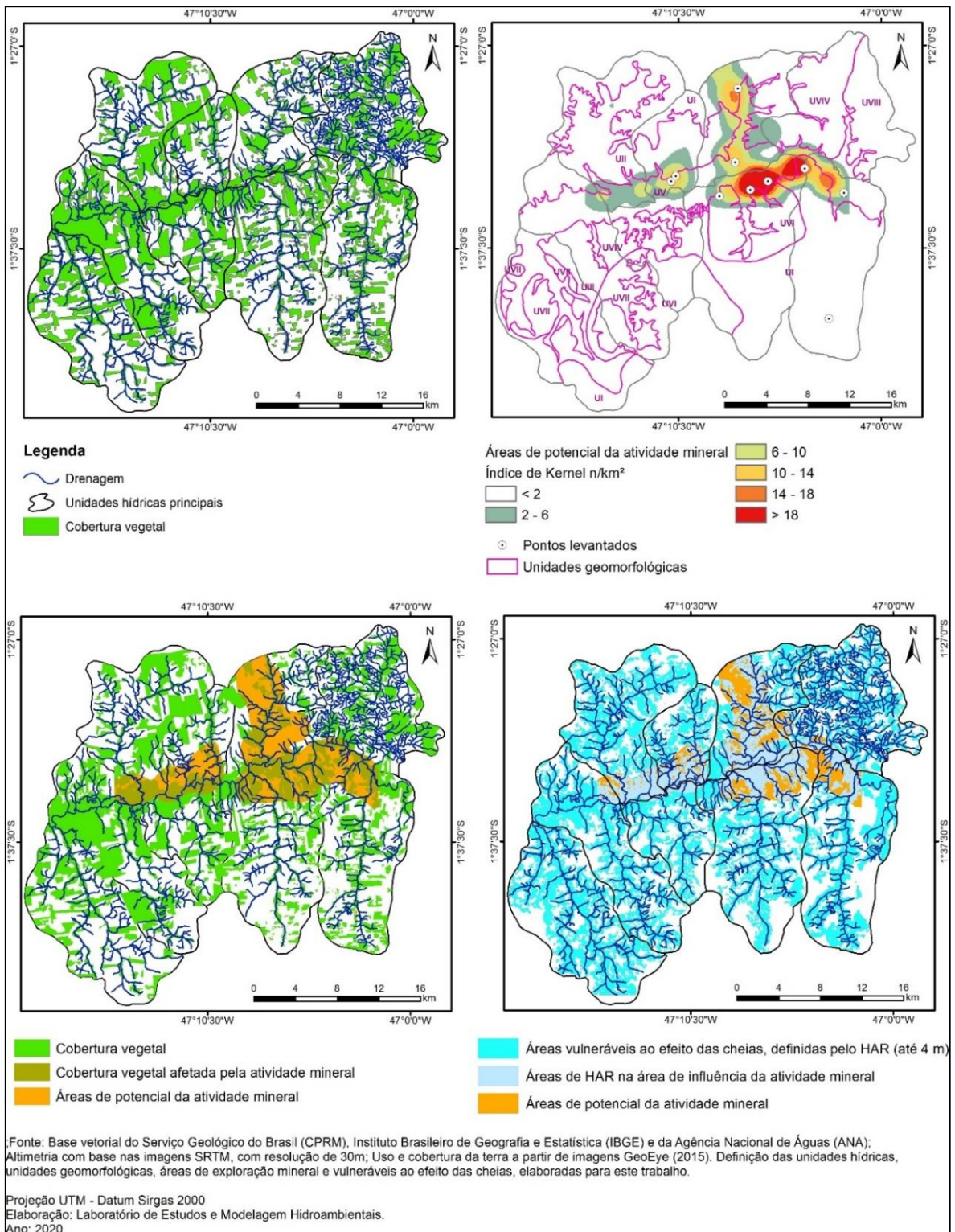


Figura 3. Espacialização da cobertura vegetal, das ocorrências da atividade mineral e das áreas vulneráveis ao efeito das cheias.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 4 indica que a região definida como de potencial mineral, responde pela maior intensidade da precipitação com valores que se aproximam na média de 1 mm/h. O que implica na ação intensiva das chuvas, que pode significar o incremento do escoamento superficial, como também do efeito de “*splash*” da gota de chuva; onde seu impacto no solo descoberto aumenta sua densidade (devido à compactação e formação de crostas, que inicialmente formam uma textura relativamente lisa, mas depois em longo prazo, geram o aumento da rugosidade superficial), que dependendo do tipo de solo, textura, estrutura e umidade pode gradar de uma erosão laminar para ravinamentos, impactando também os sistemas hídricos pela redução das taxas de infiltração (FERNÁNDEZ-RAGA et al., 2017). Desta forma, a intensidade da erosão por respingo depende principalmente da resistência do solo à erosão e da energia cinética das gotas de chuva, assim como da variação espacial e temporal da precipitação, o que representa um fator presente na área avaliada, que permanece com um potencial constante de influência do regime de chuvas.

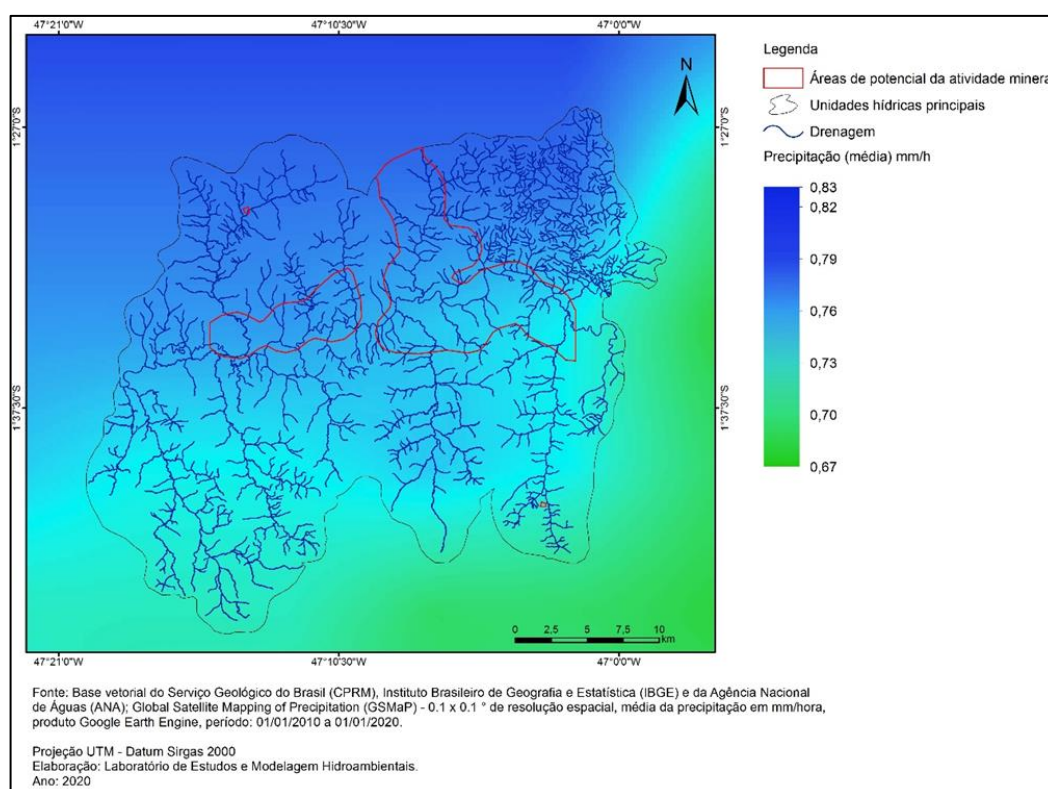


Figura 4. Espacialização da precipitação, média em mm/hora de 01/01/2010 a 01/01/2020.
Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Figura 3 observa-se que a área que define a zona de concentração da atividade mineral tem cerca de 16% de cobertura vegetal, sendo representada em 70% por áreas identificadas pelo HAR como vulneráveis à ação das águas, com a influência de uma intensidade pluviométrica próxima a de 1 mm/h. Nestes locais, a maioria dos sedimentos acaba sendo armazenada localmente em vales, com a redução do

transporte através do sistema, isso resulta em deposição em larga escala, principalmente nas bacias de cabeceira, cuja carga sedimentar não pode ser movida pela descarga (KATZ et al., 2014). A perturbação induzida pela atividade mineral se manifesta e se propaga com padrões espaciais e temporais específicos, o efeito sobre o declive, área de drenagem e taxa de formação de ravinas é determinado pelos requisitos topográficos e hidrológicos mínimos para formação da incisão e subsequente voçorocamento.

O produto destas interações é apresentado nas Tabelas 4 e 5 com o desenvolvimento de voçorocas em ambientes vinculados a antigas cavas abandonadas e em vertentes de morros e morrotes formados a partir do acúmulo de rejeito advindo do processamento da atividade mineral.

Em todas as situações avaliadas a modificação do relevo original é um dos principais motivos da ocorrência das voçorocas, visto que a maior parte delas são oriundas de aberturas de cavas e elevação da topografia por acúmulo de rejeitos. Conseqüentemente, com o aumento da declividade nessas áreas específicas, o escoamento superficial também é elevado, contribuindo para a evolução da voçoroca, assim como descrito por Souza et al. (2016). A diversidade de feições secundárias identificadas junto às voçorocas avaliadas, demonstra a vulnerabilidade do ambiente, destacada no conjunto de variáveis das Figuras 3 e 4, ressaltando os elementos altimétricos e a concentração destas em torno dos vales, com a ampliação da retenção de sedimentos em torno destes, influenciando assim o potencial de assoreamento.

O perfil de alteração contribui consideravelmente na evolução das voçorocas, onde o material arenoso é erodido com maior facilidade, dada a porosidade/permeabilidade mais elevadas quando comparadas ao material argiloso. Onde os depósitos sedimentares da Formação Barreiras encontram-se pouco ou intensamente intemperizados; e os depósitos Pós-Barreiras marcados por sedimentos inconsolidados de granulometria argila, silte e areia fina, apresentando clastos dispersos de seixos de até 5cm, depositados sobre superfícies irregulares, comumente recobertas por níveis detríticos.

O potencial de degradação destes ambientes se amplia pela dificuldade de implantação dos projetos de recuperação de áreas abandonadas pela atividade mineral. Dependendo das dimensões das estruturas formadas, ações como simples recomposição topográfica com reflorestamento ou reabilitação para formação de novas áreas com potencial de aproveitamento paisagístico se tornam financeiramente mais onerosas. Outro destaque é a não reativação da feição pela ação do escoamento superficial e das chuvas. A estabilização de feições volumetricamente expressivas (média a muito grande) deve ter monitoramento ao longo do tempo e principalmente não ser submetida a um novo ciclo de exploração mineral. Tais elementos são necessários para que o processo não evolua, tornando a voçoroca mais crítica para o adequado manejo.

Tabela 4. Caracterização das voçorocas: Antigas cavas abandonadas.

Sub-Bacias	Igarapé Açú	Igarapé Grande	Igarapé Grande	Igarapé Grande	Igarapé João Alves
Origem	Antigas cavas abandonadas				
Voçoroca	A	E	F	G	I
	01°41'10,8"S 47°02'53,8"W	01°34'50,2"S 47°08'26,2"W	01°34'28,5"S 47°06'46,4"W	1°33'21,8"S 47°03'57"W	01°34'02,2"S 47°10'52,3"W
Tipo	Desconectada			Conectada	Desconectada
Forma	Irregular			Ramificada	Irregular
Área (m²)	1.281,5	426,5	7.741,2	943,9	3521,1
Comprimento (m)	47	22	136	71	94
Largura (m)	30	17,5	70,5	15,5	35
Profundidade (m)	5,6	4,2	3,8	13,3	3,2
Volume erodido (m³)	7.176,4	1.791,3	29.416,5	12.553,8	11.267,5
Tipo de material	Composição heterogênea, apresentando horizonte de areia fina a média na base, gradando para um horizonte argilo-siltoso em direção ao topo. Além disso, também é possível observar clastos de quartzo de até 5cm dispersos no perfil.	Material de composição heterogênea, com argila na base, gradando para granulometria silte em direção ao topo. Além disso, também foram observados clastos de quartzo de até 7cm dispersos em meio ao material argilo-siltoso, com maior concentração nas porções basais.			Material de composição heterogênea, com argila e silte na base, gradando para granulometria areia fina a média em direção ao topo. Além disso, também foram observados clastos de quartzo de até 5cm dispersos em meio as matrizes arenosas e argilo-siltosas.
Feições erosivas	Alcovas de regressão, pedestais, escamamento, dutos, marmitas, filetes subverticais e movimento de massa	Alcovas de regressão, pedestais, escamamento, sulcos, dutos, canais, ravinamento, filetes subverticais e movimento de massa. Além disso, foram observadas estruturas sedimentares de gretas de contração na base da voçoroca.			Pedestais, dutos, sulcos e ravinamentos.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 5. Caracterização das voçorocas: vertentes de morros e morrotes formados a partir do acúmulo de rejeito advindo do processamento da atividade mineral.

Sub-Bacias	Igarapé Açú	Igarapé Curuçá	Igarapé Curuçá	Igarapé Grande	Igarapé João Alves
Origem	Vertentes de morros e morrotes formados a partir do acúmulo de rejeito advindo do processamento da atividade mineral				abertura de canais de escoamento
Voçoroca	B 01°34'55,5"S 47°01'36,5"W	C 01°29'17,4"S 47°07'25,1"W	D 01°33'03"S 47°07'44,7"W	H 01°34'02"S 47°05'52"W	J 01°33'45,4"S 47°10'37,9"W
Tipo	Desconectada		Desconectada	Desconectada	Desconectada
Forma	Ramificada		Ramificada	Irregular	Linear
Área (m²)	412,8	1.389,6	8.467,8	2.128,9	85,3
Comprimento (m)	45	50	62,5	93	27
Largura (m)	11	30	70	27	3
Profundidade (m)	8	12,8	16	4,5	1,6
Volume erodido (m³)	3.302,4	17.786,8	135.484,8	9.580,1	136,5
Tipo de material	Composição heterogênea, apresentando areia muito fina na base, gradando para areia média em direção ao topo.	1- a porção central e nordeste do morro é composto por areia branca de granulometria média a grossa, com clastos de quartzo de até 0,5cm dispersos em meio ao material arenoso; 2- já a porção sudoeste do morro é composta por areia avermelhada de granulometria média, apresentando pequena porcentagem de silte e areia muito fina (10-15%) intercalados com o material arenoso, além de clastos de quartzo de até 0,5cm dispersos em meio a matriz areno-siltosa.	Composição heterogênea, apresentando areia média a grossa intercalada com areia fina e argila. Além disso, também é possível observar clastos de quartzo de 1 a 10cm dispersos em meio ao material arenoso.	Material de composição heterogênea, com argila na base, gradando para granulometria silte em direção ao topo. Além disso, também foram observados clastos de quartzo de até 7cm dispersos em meio ao material argilo-siltoso, com maior concentração nas porções basais.	Material de composição heterogênea, com argila e silte na base, gradando para granulometria areia fina a média em direção ao topo. Além disso, também foram observados clastos de quartzo de até 5cm dispersos em meio as matrizes arenosas e argilo-siltosas.
Feições erosivas	Pedestais, escamamento, sulcos, ravinamento e movimento de massa	Solapamento, pedestais, escamamento, sulcos, ravinamento, costelas e marmitas	Alcovas de regressão, escamamento, sulcos, ravinamento, costelas, filetes subverticais, marmitas e movimento de massa	Alcovas de regressão, pedestais, escamamento, sulcos, dutos, canais, ravinamento, filetes subverticais e movimento de massa. Além disso, foram observadas estruturas sedimentares de gretas de contração na base da voçoroca.	Pedestais, dutos, sulcos e ravinamentos. Além disso, foram observadas estruturas sedimentares de gretas de contração na base da voçoroca "J".

Fonte: Elaborado pelos autores.

O manejo destas áreas deve facilitar uma melhor integração paisagística e evitar o aparecimento de ravinas, seguindo diretrizes geomorfológicas que busquem o preenchimento com o próprio resíduo mineral e a adequação às condições climáticas e edáficas locais, podendo ser avaliado o uso de intervenções florestais e/ou agrícolas; neste contexto, o manejo pode envolver uma abordagem sustentável com a recuperação do ambiente natural e do ambiente social ao mesmo tempo, em uma relação de benefício mútuo e reciprocidade (ABAD, 2019).

Na análise segundo as sub-bacias envolvidas, deve-se ressaltar a necessidade de regulação da atividade e contenção do efeito do desmatamento, que além das perdas florestais, interfere no escoamento superficial, na retenção de solo e na recarga da água subterrânea, uma vez que a região apresentou uma diversidade de formas de uso da terra, onde as práticas agrícolas e de mineração associadas podem resultar no agravamento do efeito da degradação da terra, com a expansão das voçorocas tornando estas áreas vulneráveis aos efeitos extremos das águas, principalmente no período chuvoso, resultando em enxurradas e remoção (e posterior deposição) de um volume expressivo de sedimentos (MABEY et al., 2020).

Para Martín Duque et al. (2015) o manejo das áreas de ocorrência de voçorocas deve atentar para a inclinação em que se desenvolvem, em função da posição fisiográfica onde aparecem, destacando as áreas de rejeitos abandonados, que estão geralmente associadas a formas dissecadas de maneira intrincada, cortadas por ravinas, estes acidentes geográficos são influenciados por componentes naturais ou induzidos pelo homem de paisagens urbanas ou rurais. O processo de reabilitação deve contemplar: os acidentes geográficos integrados na paisagem circundante; as áreas circundantes; e no caso da atividade mineral ainda ser uma oportunidade potencial, o desenvolvimento da mineração deve ser avaliado, entendendo um processo de reabilitação gradual visando garantir a estabilidade do terreno (WANG et al., 2012; GRANT et al., 2016).

O manejo das voçorocas identificadas e de outras que possam ocorrer na bacia do rio Guamá, pode ser avaliado em termos da reorganização do escoamento superficial, retenção de sedimentos na parte interna da voçoroca e da revegetação das áreas de captação (cabeceira) e interna (Figura 5). Considerando os conceitos apresentados em Verдум et al. (2016), admite-se que o ajuste topográfico, vai depender das dimensões da voçoroca, podendo serem realizadas as opções de terraplenagem, suavização de barrancos ou retaludamento para recuperação da declividade. Outra alternativa, principalmente em voçorocas que se desenvolveram sobre canais de drenagem é a construção de terraços e bacias de retenção na parte superior da voçoroca, estes podem ser associados a sulcos em nível ou banquetas individuais que consistem em patamares construídos, geralmente, em formato circular ou elíptico associados a técnicas vegetativas. Em casos onde o escoamento superficial é muito intenso devem ser conjugados sistemas para o ordenamento e dissipação da energia das águas superficiais, tais como, canais escoadouros, valetamentos (sulcos 50 a 60 cm de largura e profundidade) e drenos nos leitos das voçorocas.

Vinculada à questão hídrica, tem-se o transporte de sedimentos e sua retenção na parte interna da voçoroca. Normalmente observa-se a implantação de uma cobertura vegetal inicial da área erodida, assim como a construção de aceiros, ou seja, faixas

de menor rugosidade (lisas) onde a vegetação foi removida. Porém, como destaca Machado et al. (2006), podem ser construídas estruturas específicas, tais como: barragens de terra, construção de barreiras, diques de madeira, muros de gabiões, enrocamentos ou diques de pedra, espigões transversais, muros de contenção, cordões de pedra e quebra-ventos.

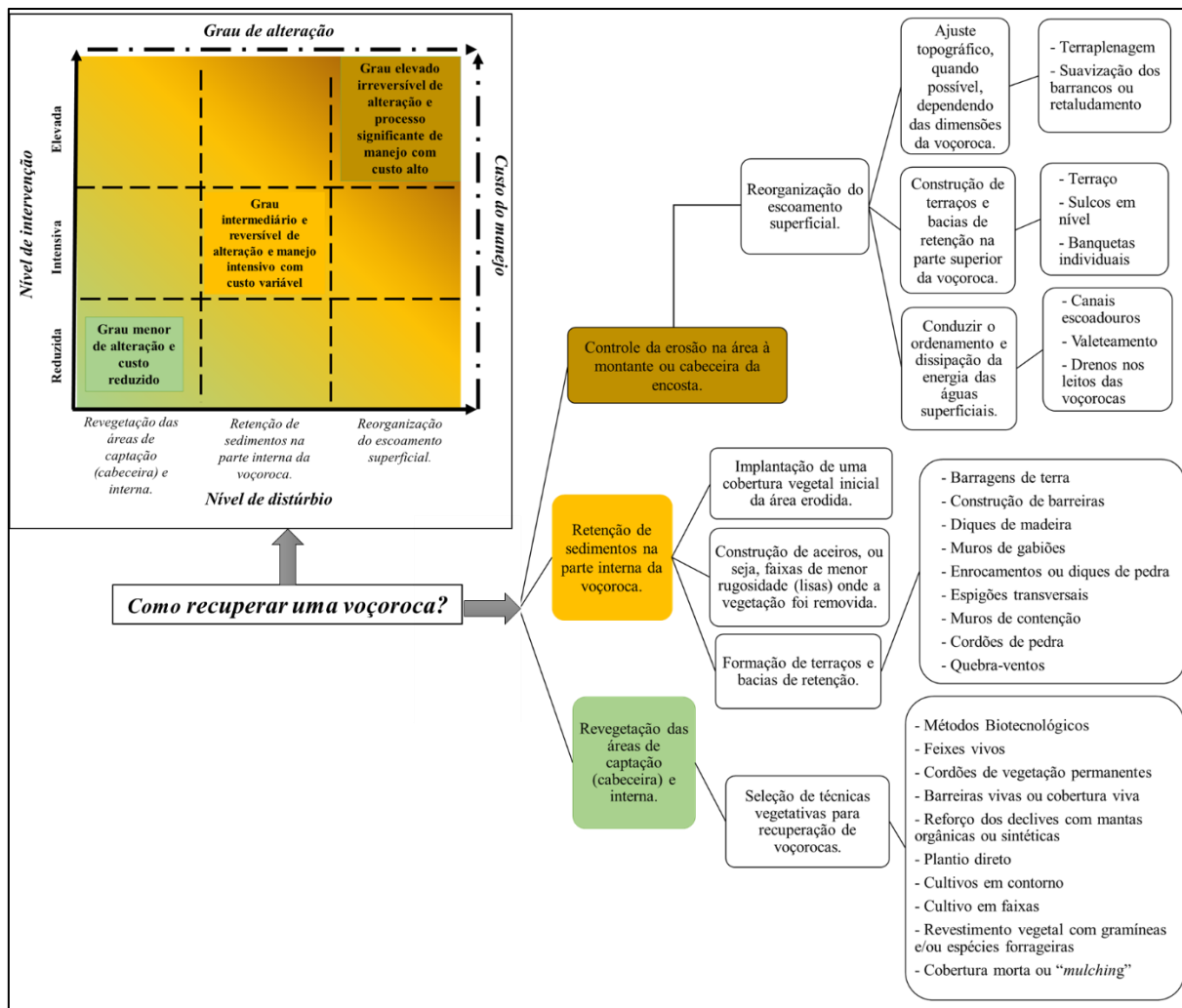


Figura 5. Síntese das propostas de manejo aplicadas às áreas de aproveitamento mineral. **Fonte:** Adaptado de Machado et al. (2006), Chaves (2012), Grant et al. (2016) e Verdum et al. (2016).

As técnicas de revegetação, como discutido em Chaves (2012) e Verdum et al. (2016), representam um conjunto de alternativas diversas que podem envolver métodos biotecnológicos, cordões de vegetação permanentes, barreiras vivas ou cobertura viva e cobertura morta, técnicas de plantio direto e revestimento vegetal com gramíneas e/ou espécies forrageiras; sendo importante a adequação das espécies às condições topográficas e a textura de solo associada.

Por fim, Grant et al. (2016) avaliam que o custo aumenta com a dificuldade em recuperar a área, podendo existir voçorocas cujo processo de manejo seja limitado tanto por questões técnicas, quanto financeiras de investimento. O importante é o minerador evitar o seu desenvolvimento, seguindo um plano de lavra, que associe a exploração mineral e recuperação ambiental em paralelo, desta forma, os processos sempre irão recair em uma faixa intermediária à baixa de recursos em função de técnicas mais simplificadas e de menor intervenção na termos de obras de engenharia.

CONCLUSÃO

A análise aplicada às voçorocas mapeadas em sub-bacias do médio-alto curso da bacia do rio Guamá indicou um comprometimento de 137,40 km², impactando principalmente as sub-bacias do Ig. Curuça (33,64%) e Ig. Grande (23,56%), assim como uma área de 65,81 km² da cobertura vegetal total (16,31%). Esta zona de concentração da atividade mineral tem cerca de 70% de sua área identificada como vulnerável à ação das águas superficiais e das chuvas, pela ação de uma intensidade pluviométrica próxima a de 1 mm/h.

A análise geomorfológica observou 3 zonas distintas: (1) igarapé Pacuí Miri, Canais da margem direita do rio Guamá e igarapé Pacuí Claro; (2) igarapé Puraquequara, igarapé João Alvese igarapé Ajará; e (3) igarapé Grande, igarapé Açú, igarapé Cuia e igarapé Curuça. Sendo que as áreas onde foram mapeadas as voçorocas encontram-se principalmente nas Zonas 2 e 3, refletindo unidades de terreno marcadas por um relevo plano em regiões de planície, dominando vales abertos (Unidade V) no vale principal do rio Guamá e da sub-bacia do Ig. Curuça; e por formas suavemente onduladas a planas, com colinas de baixas amplitudes e áreas aplainadas (Unidade VI) principalmente na sub-bacia do Ig. Grande. Destaca-se que esta região apresentou mais de 50% de sua área alterada segundo o mapeamento de uso e cobertura da terra.

A caracterização física das sub-bacias, seu mapeamento de uso e cobertura da terra e a avaliação quali-quantitativa das voçorocas identificadas, conduziram que esta trata-se de uma região onde o processo de manejo deve ser priorizado, porém as técnicas a serem empregadas já não ficam em uma zona de baixo custo, dada as dimensões observadas. Logo, faz-se necessária a correta gestão do setor mineral desta região, que é voltado principalmente para o aproveitamento para construção civil, para evitar transtornos sociais e econômicos em uma área onde cerca de 54% já é destinado ao uso agropecuário e 42% com cobertura florestal remanescente ou secundária.

AGRADECIMENTO

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) do Brasil.

REFERÊNCIAS

ABAD, C. J. P. Environmental recovery of abandoned mining areas in Spain: sustainability and new landscapes in some case studies. *Journal of Sustainability Research*, v. 1, e190003, 2019. doi.org/10.20900/jsr20190003

AKIO, N.; LIMA, A. M. M.; ROCHA, N. C. V.; LIMA, I. F. Hidrogeomorfologia da bacia hidrográfica do rio Guamá - Amazônia Oriental - Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 21, p. 759-782, 2020.

CAMPOS, E. H.; ALVES, R. R.; SERATO, D. S.; RODRIGUES, S. C. A ocorrência de feições erosivas como evidência da evolução de voçoroca em Uberlândia-MG. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.1, n. 2, p. 64-77, 2008.

CASTILLO, C.; GÓMEZ, J. A. A century of gully erosion research: urgency, complexity and study approaches. *Earth-Science Reviews*, v. 160, p. 300-319, 2016. doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.009

CHAVES, T. A. *Recuperação de áreas degradadas por erosão no meio rural*. Niterói: Programa Rio Rural, 2012, 19 p.

COELHO, Y. C. M.; LUCAS, F. C. A.; SARMENTO, P. S. M. Percepção ambiental e mineração de agregados: o olhar da população urbano-rural de Ourém, Pará, Brasil. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, v. 53, p. 38-60, 2020. doi: 10.5380/dma.v53i0.60771

DILTS, T. E.; YANG, J.; WEISBERG, P. J. Mapping riparian vegetation with lidar data predicting plant community distribution using height above river and flood height. *ArcUser Online*, p. 18-21, 2010. Disponível em www.esri.com/news/arcuser/0110/mapping-with-lidar.html.

FERNÁNDEZ-RAGA, M.; PALENCIA, C.; KEESSTRA, S.; JORDÁN, A.; FRAILE, R.; ANGULO-MARTÍNEZ, M.; CERDÁ, A. Splash erosion: a review with unanswered questions. *Earth-Science Reviews*, v. 171, p. 463-477, 2017. doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.009

GRANT, C.; LOCH, R. J.; McCAFFREY, N. *Mine rehabilitation: leading practice sustainable development program for the mining industry*. New South Wales: Australian Government, Minister for Foreign Affairs, 2016, 76 p.

IBGE. *Manual técnico de pedologia*. Manuais técnicos de Geociências, n. 4, Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015, 430p.

IBGE. *Manual Técnico de Uso da Terra*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013, 250p.

KARYDAS, C.; PANAGOS, P. Towards an assessment of the ephemeral gully erosion potential in Greece using Google Earth. *Water*, v. 12, n. 603, p. 1-17, 2020. doi:10.3390/w12020603

KATZ, H. A.; DANIELS, J. M.; RYAN, S. Slope-area thresholds of road-induced gully erosion and consequent hillslope-channel interactions. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 39, n. 3, p. 285-295, 2014. doi: 10.1002/esp.3443.

MABEY, PRINCE T; LI, WEI; SUNDUFU, ABU J.; LASHARI, AKHTAR H. Environmental impacts: local perspectives of selected mining edge communities in Sierra Leone. *Sustainability*, v. 12, n. 5525, p. 1-162020. doi:10.3390/su12145525

MACHADO, R. L.; RESENDE, A. S.; CAMPELLO, E. F. C. *Recuperação de voçorocas em áreas rurais*. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2006, 63 p.

MARTÍN DUQUE, J. F.; ZAPICO, I.; OYARZUN, R.; LÓPEZ GARCÍA, J. A.; CUBAS, P. A descriptive and quantitative approach regarding erosion and development of landforms on abandoned mine tailings: new insights and environmental implications from SE Spain. *Geomorphology*, v. 239, p. 1-16, 2015. doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.02.035

MIRANDA, A. C. S. *Erosões urbanas para percepção de risco: o caso das voçorocas na cidade de Açailândia-MA*. 2019. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.

MIRANDA, A. C. S.; LIMA, A. M. M. Análise de Erosões Urbanas e o Risco associado as Voçorocas de Açailândia-MA. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.14, n. 2, 2021. doi.org/10.26848/rbgf.v14.2.p%25p

OLIVEIRA, U. C.; OLIVEIRA, P. S. Mapas de Kernel como subsídio à gestão ambiental: análise dos focos de calor na bacia hidrográfica do rio Acaraú, Ceará, nos Anos 2010 a 2015. *Espaço Aberto*, v. 7, n.1, p. 87-99, 2017.

SOUZA, J. T. M.; PENA, H. W. A.; SILVA, B. E. B. Análise espacial das atividades de mineração: expansão das áreas de cavas de seixo e areia no município de Ourém, PA. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, v. 1, p. 1-32, 2016.

VASQUEZ, M. L.; SOUSA, C. S.; CARVALHO, J. M. A. *Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Pará, escala 1:1.000.000*. Programa Geologia do Brasil (PGB), Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil, Mapas Geológicos Estaduais. CPRM - Serv. Geol. Brasil, Superintendência Regional de Belém/PA, 2008, 328p.

VERDUM, R.; VIEIRA, C. L.; CANEPPELE, J. C. G. *Métodos e técnicas para o controle da erosão e conservação do solo*. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2016, 50p.

WANG, X.; LI, X.; LIANG, S.; NIU, Q. Effect of gully topography on overlying strata behavior and failure characteristics in a longwall top coal caving face: a parametric study. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 22, n. 03, p. 1043-1072, 2017.